

УДК 535:621.373.826:539

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ С МАЛЫМ ВРЕМЕНЕМ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД ЛАЗЕРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

© Н. Н. Рубцова¹, Г. М. Борисов^{1,2}, В. Г. Гольдорт¹, А. А. Ковалёв¹,
Д. В. Ледовских¹, В. В. Преображенский¹, М. А. Путято¹,
Б. Р. Семягин¹

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: rubtsova@isp.nsc.ru

Рассмотрены конструкции зеркал с насыщающимся поглощением как монолитные, выращенные из полупроводниковых материалов, так и зеркала с диэлектрическим отражателем с переносом на диэлектрик полупроводниковых структур, содержащих квантовые ямы. Для обоих типов зеркал получена высокая отражательная способность в области ближнего ИК-диапазона спектра: для полупроводниковых отражателей ширина «оптического стола» составляет около 100 нм, для диэлектрических — более 200 нм. Показана возможность максимальной глубины модуляции поглощения от 1 до 40 %. Время восстановления насыщающегося поглотителя (порядка 2 пс) делает такие зеркала принципиально пригодными для использования в лазерах с частотой следования импульсов до 1 ГГц.

Ключевые слова: квантовые ямы, полупроводниковые зеркала с насыщением поглощения, пассивная синхронизация мод лазеров.

DOI: 10.15372/AUT20190503

Введение. В настоящее время исследователям, работающим в области фемтосекундной лазерной физики, доступны коммерческие зеркала с насыщающимся поглощением для широкого набора лазеров. Это стало возможным после изобретения полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением из квантовых ям или квантовых точек [1, 2]. Параметры коммерческих зеркал не всегда устраивают пользователей; зачастую лучшие результаты достигаются с применением зеркал, сконструированных для конкретных лазеров [3].

В данной работе поставлена цель поиска структуры зеркал с насыщающимся поглощением, которая могла бы удовлетворять ряду основных требований, предъявляемых к таким зеркалам. Речь идёт о широком спектре отражения зеркал (широкополосность), о малом времени восстановления насыщающегося поглотителя (быстродействие), о высоком пороге разрушения рабочим излучением, а также о перспективе удешевления подобных изделий.

Образцы зеркал и их тестирование. Предлагаемая работа нацелена на использование зеркал с насыщающимся поглощением в одном из наиболее перспективных лазеров ближнего инфракрасного диапазона на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$. Этот кристалл обладает широкой полосой усиления и высокой эффективностью оптической накачки, что делает его привлекательным при разработке компактных фемтосекундных лазеров с высокой частотой следования импульсов [4, 5]. Прослеживается тенденция включения ионов Yb^{3+} в другие кристаллические матрицы, керамики и стекловолокно, поэтому отража-

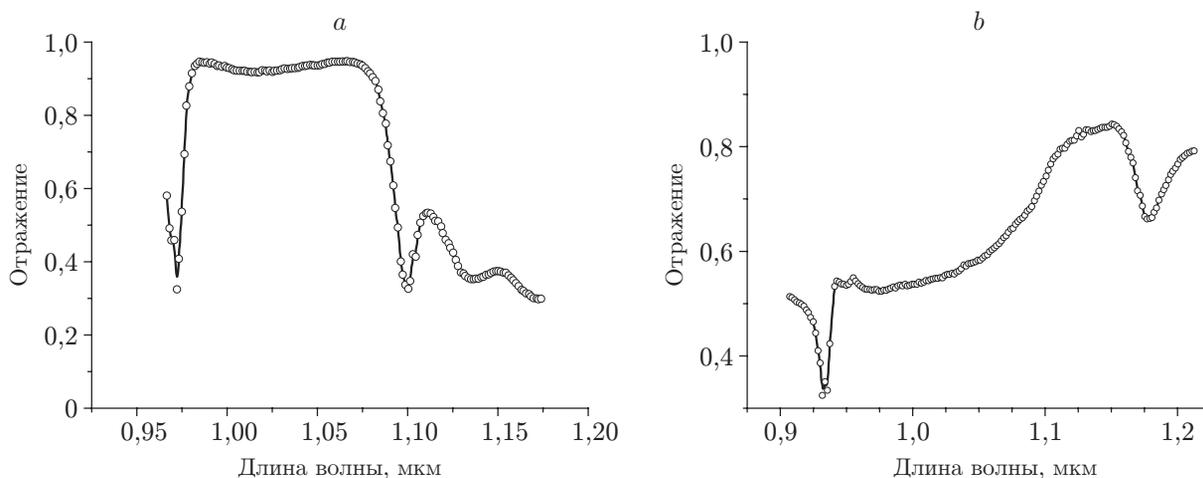


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента отражения для зеркал с насыщающимся поглощением: для полупроводникового отражателя (а) и диэлектрического отражателя (b)

тельная часть зеркал, предназначенных для пассивной синхронизации мод лазеров с такими активными средами, должна быть по возможности более широкополосной.

Полупроводниковые структуры для зеркал с насыщающимся поглощением выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В качестве подложек использовались полуизолирующие пластины GaAs(001) класса epi-ready. Скорость роста отдельных слоёв контролировалась *in situ* по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса картины дифракции быстрых электронов на отражение. Период осцилляций соответствует времени роста одного монослоя кристаллического материала в направлении (001). Такой метод контроля позволяет получать заданные толщины слоёв в выращенной структуре с точностью $\pm 1\%$. Потоки атомов Ga, Al и In формировались источниками эффузионного типа, поток молекул As_4 — вентильным источником. В качестве шихтовых материалов применялись высокочистые материалы класса не ниже 6N5. Зеркала с насыщающимся поглотителем на диэлектрическом отражателе изготавливались на основе полупроводниковой структуры, содержащей между подложкой и квантовыми ямами слой $In_{0,48}Ga_{0,52}P$. Этот материал обладает высокой избирательностью травления в определённых средах по отношению к материалу подложки GaAs, что позволяет химическими методами удалять подложку, оставляя квантовые ямы. После роста такой структуры на её поверхность наносились диэлектрические слои зеркала, затем структура со стороны зеркала соединялась с носителем, в качестве которого могут использоваться различные материалы, например сапфир, и подложка удалялась.

Отражательная часть для монолитных полупроводниковых зеркал состояла из 29 пар четвертьволновых слоёв GaAs и AlAs. Для зеркал с переносом насыщающегося поглотителя на диэлектрик отражатель был образован пятью слоями ZrO_2 и четырьмя слоями SiO_2 . На рис. 1, а показан спектр отражения монолитного полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением с максимальной глубиной модуляции 10 %, а на рис. 1, b — спектр отражения зеркала с диэлектрическим отражателем и максимальной глубиной модуляции потерь около 40 %. Видно, что ширина стопа диэлектрического отражателя почти вдвое превышает спектральную ширину полупроводникового отражателя.

В качестве насыщающегося поглотителя в обеих конструкциях зеркал использованы квантовые ямы $In_{0,25}Ga_{0,75}As$ толщиной в 27 монослоёв, разделённые барьерами из GaAs толщиной в 5 монослоёв. Это так называемые квантовые ямы первого рода, для которых и электроны, и дырки локализованы в потенциальных ямах каждого слоя $In_{0,25}Ga_{0,75}As$,

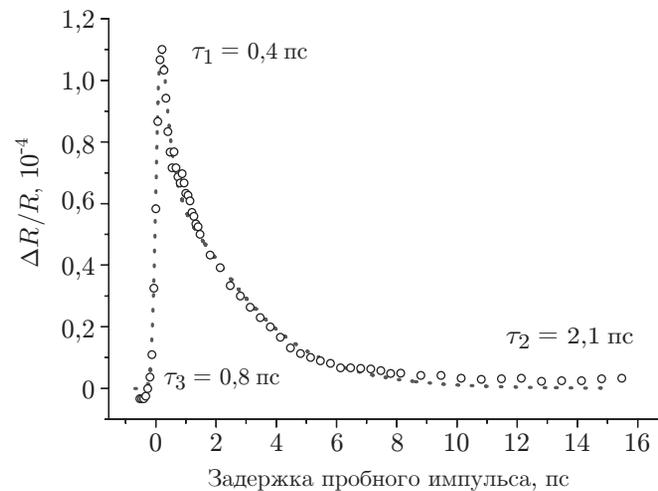


Рис. 2. Кинетика просветления и релаксации структуры с переносом квантовых ям на диэлектрик со временем восстановления насыщающегося поглотителя около 2 пс

окружённого барьерами из GaAs. Показанные на рис. 1 уровни линейного поглощения 10 и 40 % представляют максимально возможную глубину модуляции потерь. Реально достижимая в лазере глубина модуляции потерь определяется плотностью энергии рабочего излучения на поверхности зеркала с насыщающимся поглощением. С увеличением числа квантовых ям максимальная глубина модуляции потерь возрастает, но эта зависимость не является прямо пропорциональной.

Для исследования кинетики просветления и восстановления линейного поглощения зеркал использовался метод накачка-зондирование с двойной модуляцией [6], позволяющий регистрировать относительные изменения отражения вплоть до $5 \cdot 10^{-6}$ [7]. На рис. 2 показана кинетика просветления и восстановления насыщающегося поглотителя, полученного переносом полупроводниковых структур с квантовыми ямами на диэлектрический отражатель, для интенсивности накачки $2,7 \text{ ГВт/см}^2$. Излучение пучка накачки (лазер FL-1000, фирма «Солар», Беларусь) фокусировалось в пятно радиусом 30 мкм. Штриховая линия на рис. 2 представляет подгонку экспериментальных данных в рамках модели [8], учитывающей эволюцию локализованных в квантовых ямах экситонов и электронно-дырочных пар. На рисунке $\tau_1 = 0,4$ пс — время ионизации экситонов, локализованных в квантовых ямах, $\tau_3 = 0,8$ пс — время установления квазиравновесия электронно-дырочных пар, а $\tau_2 = 2,1$ пс — время электронно-дырочной рекомбинации. Последнее время релаксации определяет быстрое действие зеркала с насыщающимся поглощением.

Для насыщающегося поглотителя той же структуры на полупроводниковом зеркале получено время восстановления насыщающегося поглотителя около 2–3 пс, разброс определяется латеральной неоднородностью образца при эпитаксиальном росте. Измеренные времена восстановления насыщающегося поглотителя позволяют рассматривать данные структуры как перспективные для применения в лазерах с высокой частотой следования импульсов. Амплитуда просветления на рис. 2 ограничена энергией импульса лазерного излучения, использованного для диагностики, и не соответствует полному насыщению поглощения.

Обсуждение результатов. Время восстановления поглощения полупроводникового поглотителя около 2 пс, измеренное в представленной работе для квантовых ям, разделённых тонкими барьерами, существенно меньше типичных (составляющих сотни пикосекунд) времён электронно-дырочной рекомбинации в системе изолированных квантовых ям, разделённых толстыми барьерами (не допускающими перекрытия волновых функций

электронов и дырок в соседних квантовых ямах). Время релаксации, полученное в этой работе, также короче времени релаксации (8 пс), измеренного в [6] для образца с квантовыми ямами, разделёнными наноструктурированными барьерами. Очевидно, что для образцов полупроводниковых поглотителей из квантовых ям, использованных в данной работе, тонкие барьеры способствуют туннелированию носителей заряда между соседними ямами. Вероятно, этот механизм ускорения релаксации оказывается здесь более эффективным, чем взаимодействие с многочисленными границами раздела в образце [6] с наноструктурированными барьерами.

Заключение. Для варианта монолитного полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем при максимальной глубине модуляции около 1 % в Институте лазерной физики СО РАН проведено тестирование в компактном лазере $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ с диодной накачкой. Получен устойчивый режим синхронизации мод с частотой следования импульсов 817 МГц, при этом нагрев зеркала не наблюдался. При повышении частоты следования импульсов до 982 МГц появлялись признаки нестабильности синхронизации мод. Оценка для порога повреждения полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением составила не менее 8,9 мДж/см², что вдвое выше порога разрушения коммерческого аналога. Зеркало с переносом поглощающей структуры на диэлектрический отражатель требует доработки.

Благодарности. Авторы данной работы признательны сотрудникам Института лазерной физики СО РАН В. С. Пивцову, С. А. Кузнецову и А. В. Семенко за предоставление результатов тестирования зеркал с насыщающимся поглощением в лазере $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-29-20007, № 18-42-543001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller U., Weingarten K. J., Kärtner F. X. et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // IEEE Journ. Sel. Top. Quant. Electron. 1996. **2**, N 3. P. 435–453.
2. Maas D. J. H. C., Bellancourt A.-R., Hoffmann M. et al. Growth parameter optimization for fast quantum dot SESAMs // Opt. Express. 2008. **16**, N 23. P. 18646–18656.
3. Kovalyov A. A., Preobrazhenskii V. V., Putyato M. A. et al. 115 fs pulses from $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser with low loss nanostructured saturable absorber // Laser Phys. Lett. 2011. **8**, N 6. P. 431–435.
4. Pekarek S., Fiebig C., Stumpf M. C. et al. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb:KGW laser with a peak power of 3,9 kW // Opt. Express. 2010. **18**, Is. 16. P. 16320–16326.
5. Kuznetsov S. A., Pivtsov V. S., Semenko A. V., Bagayev S. N. Highly efficient multimode diode-pumped Yb:KYW laser // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2017. **793**, N 1. P. 012016.
6. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалев А. А. и др. Фемтосекундная кинетика отражения зеркал с насыщающимся поглощением // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 52–56.
7. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалев А. А. и др. Техника регистрации субпикосекундной кинетики отражения или пропускания // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 87–91.
8. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалев А. А. и др. Кинетика отражения полупроводникового быстродействующего зеркала // Сибирский физический журнал. 2017. **12**, № 3. С. 109–115.

Поступила в редакцию 21.06.2019

После доработки 17.07.2019

Принята к публикации 07.08.2019